



《中国工程物理研究院科技丛书》第069号

微纳米含能材料

Micro/Nano Energetic Materials

曾贵玉 聂福德 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 069 号

微纳米含能材料

Micro/Nano Energetic Materials

曾贵玉 聂福德 杨志剑 著
陈 娅 黄亨建 譙志强

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

微纳米含能材料/曾贵玉等著. —北京:国防工业出版社,2015.5

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978-7-118-10080-8

I. ①微… II. ①曾… III. ①纳米材料—功能材料—研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第093208号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 11 1/4 字数 237 千字

2015年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 39.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 50 年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科技任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 50 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 50 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第七届编审委员会

学术顾问 杜祥琬

编委会主任 彭先觉

副主任 孙承纬 汪小琳 赵武文

委员 (以姓氏笔画为序)

王 韬	帅茂兵	田 勇	李 凡	李正宏
李泽仁	李敬明	吴兴春	何建国	何宴标
张 凯	张 健	张文平	张方晓	张保汉
陈贤林	罗文华	孟凡宝	赵 峰	赵 强
赵小东	袁光伟	莫 军	黄秀光	彭述明
曾 超	魏晓峰			

科技丛书编辑部

负责人 唐 勇

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 公开出版书目

- | | | |
|-----|--------------------------|---------------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 陈大年 编著 | 国防工业出版社 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家赣 著 | 科学出版社 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 著 | 国防工业出版社 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料的辐射效应
曹建中 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 著 | 科学出版社 1993 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 等著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术
古当长 著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图象处理
吴世法 编著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理
赖祖武 等编著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 实验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 卫玉章 周之奎 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 气体炮原理及技术
王金贵 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与冲击波
李维新 编著 国防工业出版社 2001 年 05 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著 国防工业出版社 2001年08月
- 036 含能材料热谱集
董海山 胡荣祖 姚 朴 张孝仪 编著 国防工业出版社 2001年10月
- 037 材料中的氦及氘渗透
王佩璇 宋家树 编著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文 编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张 钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年06月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的测量和分析技术
田东风 龚 健 伍 钧 胡思得 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏 毅 万 敏 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高 平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著 国防工业出版社 2004年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜 君 著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编 国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引
谭 华 著 国防工业出版社 2007年03月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍 钧 编著 国防工业出版社 2007年03月

- 054 强流粒子束及其应用
刘锡三 著
国防工业出版社 2007 年 05 月
- 055 氙和氟的工程技术
蒋国强 罗德礼 陆光达 孙灵霞 编著
国防工业出版社 2007 年 11 月
- 056 中子学宏观实验
段绍节 编著
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 057 大功率微波发生器原理
丁武 著
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 058 等离子体中辐射输运和辐射流体力学
彭惠民 编著
国防工业出版社 2008 年 08 月
- 059 非平衡统计力学
陈式刚 编著
科学出版社 2010 年 02 月
- 060 高能硝胺炸药的热分解
舒远杰 著
国防工业出版社 2010 年 06 月
- 061 电磁脉冲导论
王泰春 贺云汉 王玉芝 著
国防工业出版社 2011 年 03 月
- 062 大功率超宽带电磁脉冲技术
孟凡宝 主编
国防工业出版社 2011 年 11 月
- 063 分数阶偏微分方程及其数值解
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著
科学出版社 2011 年 11 月
- 064 快中子临界装置和脉冲堆实验物理
贺仁辅 邓门才 编著
国防工业出版社 2012 年 02 月
- 065 激光惯性约束聚变诊断学
温树槐 丁永坤 等编著
国防工业出版社 2012 年 04 月
- 066 强激光场中的原子、分子与团簇
刘杰 夏勤智 傅立斌 著
科学出版社 2014 年 02 月
- 067 螺旋波动力学及其控制
王光瑞 袁国勇 著
科学出版社 2014 年 11 月
- 068 氙化学与工艺学
彭述明 王和义 主编
国防工业出版社 2015 年 04 月
- 069 微纳米含能材料
曾贵玉 聂福德 等著
国防工业出版社 2015 年 05 月

序

微纳米含能材料是近年来随着纳米科技的发展而不断发展起来的一种新型功能材料。由于具有感度可选择、能量释放速率更快、临界直径更小、燃烧更快更充分等优异特性,微纳米含能材料已成为先进常规武器及核武器设计的重要支撑材料,在高新武器起爆、传爆及主炸药中具有广泛的应用前景,其研究成果对其他微纳米材料的制备和应用研究以及对国防现代化建设、国民经济发展和科学技术进步都有着重要的促进作用。

20 世纪 80 年代以来,中国工程物理研究院(以下简称中物院)即开展了微纳米含能材料的制备、结构表征、性能调控及应用技术研究。在掌握多种含能材料微纳化技术的同时,还获得了微纳米含能材料结构与性能的大量数据,研制了多个应用配方,掌握了其制备技术和应用技术,提高了有关武器产品的性能。本书系统地总结了中物院化工材料研究所在微纳米含能材料领域的研究成果,同时也详尽地收集了近年来世界各国在微纳米含能材料制备、结构表征及性能方面的最新研究进展,从多个角度阐述了微纳米含能材料的前沿问题及其未来发展方向。

本书作者多年从事微纳米含能材料领域相关研究,对该领域研究的进展有着全面而深入的理解,有着丰富的研究经验和心得,书中许多内容都是他们的创造性成果。他们的工作积极地推动了我国微纳米含能材料的研究进展,缩短了与国际先进水平的差距。

本书内容丰富、思路清晰,阐述了微纳米含能材料的两条基本制备途径,介绍了微纳米含能材料的结构特点、基础性能、应用性能及应用技术,以众多实例强调了理论解析和实验研究的有机结合。本书的出版将为相关技术人员提供较全面的专业知识,对从事和有兴趣参与该领域研究的科技工作者大有裨益,又可作为青年人才培养的教学参考书。



2015 年 1 月

前 言

微纳米含能材料是近年来微纳米技术与含能材料相结合而研发出来的一类性能优异的功能材料,是微纳米材料的重要组成部分,在国防等领域受到极大关注,具有十分重要的应用前景。由于其特殊的尺寸和结构,微纳米含能材料具有普通含能材料所不具有的优良物理化学特性和应用性能,国内外众多研究机构和人员在此领域投入了大量资金和时间,进行了长期不懈的努力,其制备、性能及应用研究逐渐深入,取得了一系列重要进展,相关论述也零星地散见于各种科研报告、学术刊物或会议论文集中,但还未见到系统介绍此领域成果和进展的专业书籍,导致读者查阅和使用诸多不便,许多从事微纳米含能材料及相关领域基础研究和工程应用研究的人员正为此而苦恼。为此,我们将自己多年的研究成果及国内外进展情况进行了系统总结,以微纳米含能材料为主线,从理论和实践两个层面较全面地论述了微纳米含能材料的相关知识和进展。本书的出版将填补国内外在此领域的空白。本书所述微纳米含能材料主要指体积平均粒径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下的纳米级及亚微米级有机含能材料。

本书是作者在几十年研究和广泛调研大量国内外重要文献资料的基础上归纳、提炼而成,较系统地反映了微纳米含能材料领域的相关理论和实验技术,并对微纳米含能材料带来的性能变化情况进行了阐述,既全面总结了中物院化工材料研究所多年来在微纳米含能材料领域的科研成果和经验,也充分反映了国内外微纳米含能材料研究的前沿问题和最新成就。内容上兼顾深度和广度,既论述了微纳米含能材料的研究现状和重要成果,又介绍了该领域的最新进展和发展方向,具体内容包括微纳米含能材料的研究进展、两大制备途径(离散和凝聚)、颗粒后处理技术(防团聚技术、纯化技术、分散技术、固液分离技术、干燥技术、包装与储存技术等)、结构特点与表征技术、性能等,体现了本书的系统性、完整性、新颖性和实用性,是从事微纳米材料、含能材料、微纳米粉体后处理,特别是微纳米含能材料研究、生产、应用和管理等有关人员不可多得的一本专著,还可作为高等院校相关专业的教学参考书。

本书共分6章。第1章简述微纳米含能材料的优异性能、研究现状及发展趋势,由聂福德、谯志强主笔编写;第2章、第3章分别从离散和凝聚两大基本技术途径出发介绍微纳米含能材料的制备理论和方法,由曾贵玉主笔编写;第4章介绍微纳米含能材料颗粒的常用后处理技术,由杨志剑、曾贵玉主笔编写;第5章介绍微纳米含能材料的结构表征技术及其结构特性,由陈娅、曾贵玉主笔编写;第6章介绍微纳米含能材料的主要性能及相

应评价技术,由黄亨建主笔编写。中物院化工材料研究所从事微纳米含能材料研究的其他许多同事参与了本书相关内容的研究或编写工作,杨光成、吴鹏、陈瑾、张娟、刘兰、黄兵、王平等参与了编写工作,中物院原院长朱祖良研究员对本书进行了悉心指导并赋序。田勇、李金山、李敬明、张明、唐姿文、汤业朋等为编写提出了很好的建议,中北大学曹端林教授、南京理工大学陈厚和教授对本书进行了细致认真的审查,本书得到了中物院科技丛书编写基金的资助,还引用、参考了中物院重点基金 2009A0302017、NSAF 基金 10276018、MKPT-01-075 等项目和国内外众多专家学者的研究成果。本书的完成离不开同行专家们所付出的辛勤劳动和上述项目的资助,作者在此敬致谢意。借出版之机,谨向鼓励、关心和支持本书出版的同仁及工作人员表示衷心感谢。全书由曾贵玉、聂福德统稿。

由于作者知识有限,加之微纳米技术发展迅速,新理论、新方法和新现象不断涌现,本书错误和疏漏在所难免,恳请读者批评、指正。

作 者

2015 年 3 月

本书使用的符号与缩写

σ	颗粒破碎强度
σ_{th}	材料理论强度
α	晶格常数, 指数
β	升温速率, XRD 特征衍射峰的半高峰宽
δ	滞留层厚度
θ	衍射角, 接触角
ρ	密度
ρ_a	空气密度
ρ_l	液体密度
ρ_s	固体密度
ρ_t	粉体真实密度
ρ_{TMD}	理论最大密度
ϕ	相对过饱和度 ($\phi = C - C_e$) / C_e
η	黏度
λ	波长, 热传导系数
μ	摩擦系数, 电泳淌度
ω	超声角频率, 角速度, 经时损失性
γ	表面能, 表界面张力
ζ	Zeta 电位, 超声波振幅
a	形状系数
AF(50)	团聚系数
AF*(50)	修正团聚参数
c	气体含量
c_p	定压比热容
C	浓度, 常数
C'	界面浓度
C_s	饱和浓度
CF	团聚参数
d	颗粒粒径, 粒度
d_0	破碎前颗粒原始粒径
d_{BET}	比表面积等效粒径

d_c	离心极限颗粒粒径
d_{cr}	临界直径
d_l	液滴直径
d_p	雾化液滴直径
d_s	晶粒度
d_{SAXS}	小角 X 射线散射法得到的颗粒粒径
d_{TEM}	透射电镜法得到的颗粒粒径
d_x	颗粒含量累计达到 $x\%$ 时的粒径, x 为 0 ~ 100 间的任意数字, 如 1、10、50、90 等
d_{XRD}	X 射线衍射法得到的粒径
D	爆速, 分维
D_s	表面分维
E	能量, 势能
E_a	活化能
E_A	长程范德华引力
E_R	两微粒间的斥力势能
E_{RE}	弹性斥力势能
E_{RH}	焓斥力势能
E_{RP}	渗透斥力势能
E_{Rs}	熵斥力势能
E_{RS}	空间斥力势能
E_s	表面能, 静电排斥作用能
E_S	超声能量
f_{sat}	组分在饱和状态时的逸度系数
f_{SCF}	组分在超临界流动相中的逸度系数
f	分散度
F_c	离心力
F_r	分离因数
g	重力加速度
G	电导, 重力
H_{50}	50% 爆炸特性落高
k	材料常数, 比例常数或系数
k_N	成核过程速率常数
K	玻耳兹曼常数
l	微裂纹长度
L	喷嘴特征尺寸
m	质量
m_{u1}	第一次测试的浊度
m_{u2}	第二次测试的浊度

n	指数, 转速
N	成核速率
$N_{a(50)}$	团聚体所包含的一次颗粒数
P	压力
P_c	临界压力
P_i	冲蚀压力
P_{sat}	组分在饱和状态时的分压
Q	浸润热, 分解热
r	颗粒或晶体半径, 回转半径
r^*	临界成核半径
R	气体常数, 喷嘴液气质量比
R_m	最可几孔半径
R_{mean}	平均孔径
s	溶解度
S	面积, 比表面积, 熵, 溶液过饱和度 ($S = C/C_s$)
S_{son}	超声波有效输出面积
t	时间
T	热力学温度
T_c	临界温度
u	流体速度
u_s	冲击波速度
U_T	平均阈值电压
U_i	起爆电压
v_b	研磨球碰撞速度
v_p	颗粒碰撞速度
V	体积, 速度
V_p	单位质量团聚体内的孔体积
V_m	摩尔体积
V_s	组分在固态相时的体积, 比孔容积
W	功, 能耗
y	溶质的平衡摩尔分数
Y	弹性(杨氏)模量
ΔC	绝对过饱和度, $\Delta C = C - C_s$
ΔG	体系自由能变化
ΔH	热效应(相转变热或反应热), 焓变
$\Delta \rho$	密度差
ΔS	表面积变化
Δt	时间间隔

AAO	阳极氧化铝
AFM	原子力显微镜
AN	硝酸铵
AOT	二-(2-乙基己基)-琥珀酸磺酸钠
AP	高氯酸铵
BNCP	高氯酸·[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(Ⅲ)
BTF	苯并-1,2,5-三氧化二氮茂-1,4,7-三氧化物,苯并三氧化呋咱, 苯并三呋咱氮氧化物
CL-20	六硝基六氮杂异戊兹烷
CNTs	碳纳米管
CVD	化学气相沉积法
DMF	<i>N,N</i> -二甲基甲酰胺
DMSO	二甲基亚砷
DSC	差示扫描量热法
DTA	差热分析法
GAP	端羟基叠氮聚醚
GAS	气体抗溶剂结晶过程
gel	凝胶
FTIR	傅里叶红外光谱
FTIR-PAS	傅里叶红外变换光声光谱
HDI	1,6-己二异氰酸酯
HMX	1,3,5,7-四硝基-1,3,5,7-四氮杂环辛烷
HNS	2,2',4,4',6,6'-六硝基二苯基乙烯,六硝基芪
HNS-IV	超细状态的 HNS
IGC	反气相色谱
LLM-105	2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物
LLNL	美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室
MEMS	微机电系统
MIC	亚稳态分子间复合物
NC	硝化纤维
NQ	硝基胍
NTO	3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮
NWC	美国海军武器中心
O/W	水包油型乳液
OP	烷基酚聚氧乙烯醚
OP-10	壬基酚聚氧乙烯醚
PBX	塑料粘结炸药
PC	聚碳酸酯
PCA	压缩流体抗溶剂沉淀工艺

PEG	聚乙二醇
PETN	季戊四醇四硝酸酯,太安
Picric acid	苦味酸,三硝基苯酚
PP	聚丙烯
PTFE	聚四氟乙烯
PVAC	聚乙酸乙烯酯
PVC	聚氯乙烯
PVD	物理气相沉积法
PYX	2,6-二苦氨基-3,5-二硝基吡啶
RDX	1,3,5-三硝基-1,3,5-三氮杂环己烷
RESS	超临界溶液快速膨胀结晶过程
RF	酚醛树脂
SAA	表面活性剂
SAS	超临界抗溶剂沉析过程
SCF	超临界流体
SDS	十二烷基硫酸钠
SEM	扫描电子显微镜
sol	溶胶
sol-gel	溶胶—凝胶技术
Span-80	失水山梨醇单油酸酯
STM	扫描隧道显微镜
TATB	1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯
TCTNB	均三氯三硝基苯
Tetryl	特屈儿,三硝基苯甲硝胺
TEM	透射电子显微镜
TG	热重法
THMNM	三羟甲基硝基甲烷
TNT	三硝基甲苯
UFG	超细 Al 粉
VMCC	羧基改性氯乙烯—醋酸乙烯—马来酸共聚树脂
VST	真空安定性试验
W	水
W/O	油包水型乳液
XRD	X 射线衍射
XPS	X 射线光电子能谱